



УДК 621.313.333.821

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПЕРЕМЕШИВАНИЯ ДВУХСТОРОННИМ ИНДУКТОРОМ БЕГУЩЕГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ

## NUMERICAL SIMULATION OF DOUBLE SIDE TRAVELING MAGNETIC FIELD ELECTROMAGNETIC STIRRER

**Швыдкий Евгений Леонидович**, аспирант каф. «Электротехника и электротехнологические системы», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19. E-mail: [e.l.shvydky@urfu.ru](mailto:e.l.shvydky@urfu.ru)

**Evgeniy L. Shvydkiy**, PhD student, Department «Electrical Engineering and Electrotechnology System», Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, 620002, Mira street, 19, Ekaterinburg, Russia. E-mail: [e.l.shvydky@urfu.ru](mailto:e.l.shvydky@urfu.ru)

**Аннотация:** В представленной работе приводится описание модели электромагнитного перемешивателя с бегущим магнитным полем. Совместное решение электромагнитной и гидродинамической задачи выполнено в двухмерной постановке методом конечных элементов. Поведение примесей в турбулентном потоке учтено и описывается законом Стокса. В результате полученное пространственное распределение примеси имеет равномерный характер по высоте емкости, при имеющихся «мертвых зонах».

**Abstract:** The description of the electromagnetic stirring model by traveling magnetic field is given. The coupled solution of the electromagnetic, hydrodynamic problem is performed in a two-dimensional formulation by the finite element method. The behavior of particles in turbulent flow is taken into account and described by Stokes drag law. As a result, the resulting spatial distribution of the impurity is uniform in height of the container, with the existing "dead zones".

**Ключевые слова:** бегущее магнитное поле; электромагнитное перемешивание; частицы; метод конечных элементов.

**Key words:** traveling magnetic field; electromagnetic stirring; particles; finite element method.

### ВВЕДЕНИЕ

Равномерное распределение примесей в жидком металле является актуальной задачей в современной металлургии [1]. Технология получения многих сплавов и композитных материалов заключается в ведении твердой примеси, обычно в форме частиц, непосредственно в расплавленный металл. Различные плотности металла и примеси приводит к скоплению частиц в верхней или в нижней областях емкости, а недостаточная интенсивность течения к образованию кластеров в объеме.

Применение индукционных электромагнитных устройств для повышения интенсификации металлургических процессов нашло широкое применение [2]. Такие устройства обладают рядом преимуществ относительно традиционных методов [3]. Расчет устройств электромагнитного воздействия на расплавы во многих случаях сопряжен с определенными сложностями при вычислении гидродинамических течений и нуждается в точных численных моделях [4, 5]. В

данной работе представлено исследование по разработке численной модели электромагнитного перемешивателя бегущего магнитного поля.

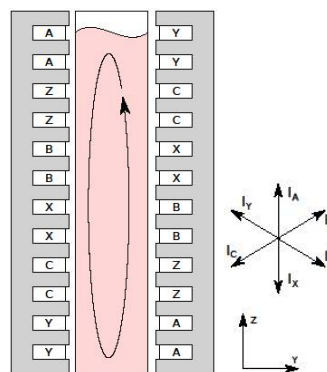


Рис. 1. Схематичное изображение исследуемого электромагнитного перемешивателя

Объектом исследования является электромагнитный перемешиватель жидкого лития, эксплуатируемый в Институте высокотемпературной электрохимии УрО РАН [6]. Схематическое изображение установки представлено на рисунке 1. Источником

магнитного поля являются 2 индуктора, расположенные по бокам емкости с жидким литием. Бегущее магнитное поле проникая в расплав наводит вихревые токи в нем и объемные электромагнитные усилия. Конфигурация этих усилий такова, что расплав, под таким воздействием начинает движение и образует один вихрь.

## МЕТОД ИСЛЕДОВАНИЯ

Как было сказано выше расчет устройств электромагнитного перемешивания состоит из решения взаимосвязанных полевых задач. На первом этапе был произведен расчет электромагнитного и гидродинамических полей [7]. На рисунке 2 представлены результаты расчета численной модели. Результатом решения электромагнитной задачи является плотность индуцированного тока и электромагнитные усилия. Эти усилия являются источником членом в уравнении движения жидкости, характер движения которой совпадает с направлением приложенных сил.

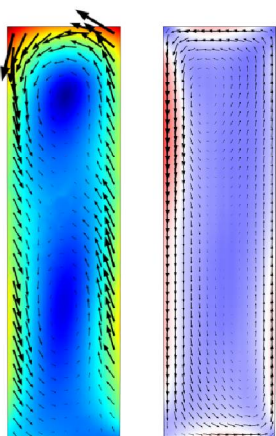


Рис. 2. Результаты расчета численной модели.

Слева: индуцированная плотность тока и электромагнитные усилия (стрелки); справа: усредненное поле скоростей жидкого металла

Разработанная трехмерная модель удобна в использовании и позволяет определять характер течений в зависимости от параметров индуктора бегущего магнитного поля. Однако такой постановки задачи не достаточно для оценки эффективности перемешивания.

Проделанный обзор литературы выявил ряд работ посвященных численному моделированию частиц в расплаве под воздействием переменного магнитного поля. В данных работах рассматриваются примеры моделирования поведения примеси в электротехнологическом оборудовании металлургического назначения: индукционных канальных печах [8], индукционных тигельных печах [1, 9],

электромагнитных индукторов бегущего и пульсирующего поля для миксеров [10] и кристаллизаторов [11, 12]. Все вышеперечисленные модели состоят в совместном расчете электромагнитного поля и гидродинамических течений с интегрированной моделью расчета траектории частиц.

На данном этапе рассматриваемая модель была улучшена путем дополнением модуля трассировки частиц «Particle Tracing for Fluid Flow». Постановка задачи двумерная. Заданные свойства частиц представлены в таблице 1.

Таблица 1.

Параметры частиц

Параметр	Значение
Материал частицы	бор
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	2000
Диаметр, мкм	2÷10

Вынуждающая поверхностная сила на частицу действует по закону Стокса:

$$F_D = \frac{1}{\tau_p} m_p (u - v) \quad (1)$$

где  $\tau_p = \frac{\rho_p d_p^2}{18\mu}$ ;  $m_p$  - масса частицы;

$u$  - скорость жидкости;  $v$  - скорость частицы,  $\rho_p$  - плотность частицы;  $d_p$  - диаметр частицы;  $\mu$  - динамическая вязкость жидкости.

Так же был произведен, учен сил плавучести, которые вызваны разностью плотностей жидкости и частиц. Численный эксперимент заключался в погружении 350 частиц через верхнюю границу расчетной области жидкого металла, находящегося под воздействием электромагнитных сил.

## РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА

Результатом расчета является пространственные положения и траектории частиц в циркулирующем потоке жидкости. На рисунке 3 представлена динамика поле скоростей в объеме жидкого металла и позиции частиц. Магнитное поле направлено против «часовой стрелки» и скорость движения расплава так же соответствует этому направлению. На первом этапе видно как частицы были погружены через верхнюю границу, затем они увлекаются течением в пристеночную область. После того как кластер был разбит на единичные частицы они, достаточно равномерно были распределены по объему жидкости. На 15 – 60 секунде видно как окончательно сформировался один вихрь захватывающий весь

объем, однако при такой конфигурации течения возникает мертвая зона в центральной области. Из этой области частицы были вытеснены центробежным течением. Это явление представляет большую проблему для

равномерного распределения примеси и может быть объяснено принятым допущением двумерной модели.

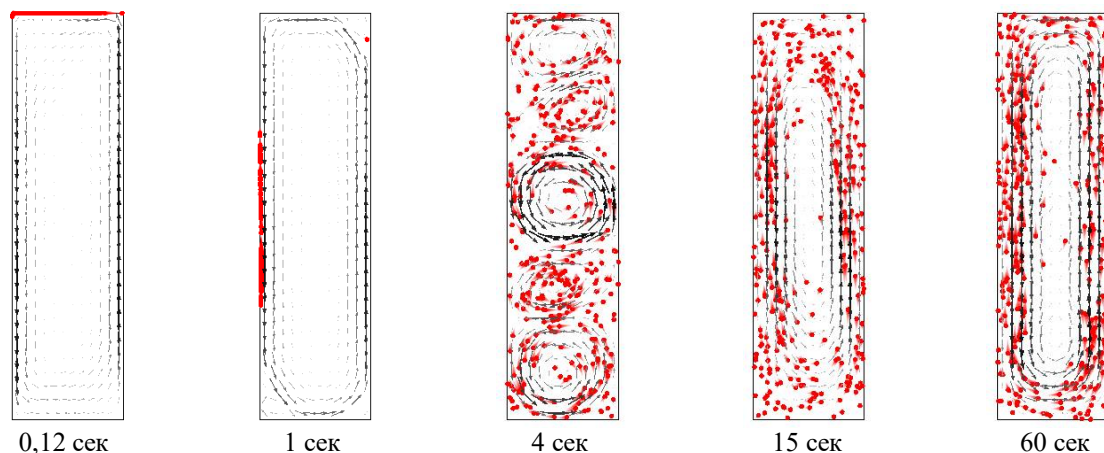


Рис. 2. Динамика положения частиц (красные точки) и поле скоростей (стрелки)

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе представлена численная модель двухстороннего электромагнитного перемешивателя бегущего магнитного поля с учетом движения частиц, являющейся продолжением исследования [7]. Полученные результаты позволяют понять механизм переноса примеси турбулентными потоками возбужденными переменным магнитным полем. В дальнейших работах необходимо провести верификацию электромагнитной задачи, провести исследование с моделированным реверсивным магнитным полем [10] и полное трехмерное моделирование распространения примеси в бегущем магнитном поле.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Kirpo, M., Jakovičs, A., Nacke, B., Baake, Particle transport in recirculated liquid metal flows // COMPEL - The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering, Vol. 27 (2), 2008, Pp. 377-386
2. Сарапулов Ф.Н., Фризен В.Э., Сокунов Б.А., Урманов Ю.Р. Снижение энергозатрат в металлургическом производстве за счет применения МГД-технологий // Промышленная энергетика. 2016. № 12. С. 21-27.
3. Болотин К.Е., Фризен В.Э., Бычков С.А. и др. Верификация численной модели лабораторного вращателя жидкого алюминия // В сб: Труды второй научно-технической конференции молодых ученых УралЭНИН УрФУ. 2017. С. 302-305.
4. Хрипченко С.Ю. Электровихревые течения в каналах МГД-устройств. Екатеринбург: УрО РАН, 2009. 261 с.
5. Бааке Э. и др. МГД технологии в металлургии. Интенсивный курс Специализация IV. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2013. 233с.
6. Сарапулов С.Ф. Индукционные магнитогидродинамические машины технологического назначения для электромеханического воздействия на металлические расплавы // дис. д.т.н. / УГТУ. Екатеринбург, 2011
7. Shvydkiy, E., Zaharov, V., Bolotin, K., Smolyanov, I., Sarapulov, S. Numerical modeling of the travelling magnetic field stirrer for liquid lithium // vol. 53 (4), 2017, pp. 707-713
8. Pavlovs, S., Jakovičs, A., Baake, E., и др. LES modelling of turbulent flow, heat exchange and particle transport in industrial induction channel furnaces // Magnetohydrodynamics, vol. 47 (4), 2011, pp. 399-412
9. Ščepanskis, M., Jakovičs, A., Baake, E., Nacke, B. A model for homogenization of solid alloying admixtures in an induction crucible furnace // Steel Research International, vol. 86 (2), 2015, pp. 169-174
10. Оборин П.А., Хрипченко С.Ю. Генерация течения жидкого металла и перенос пассивной примеси в прямоугольной полости бегущим магнитным полем // Вычислительная механика сплошных сред. 2013. Т. 6. № 2. С. 207-213.
11. Bojarevics, V., Pericleous, K., Garrido, M. и др. Travelling magnetic field mixing for particle dispersion in liquid metal // Magnetohydrodynamics, vol. 51 (3), 2015, pp. 453-460
12. Golak, S., Przulucki, R. Homogenization of electromagnetic force field during casting of functionally graded composites // IEEE Transactions on Magnetism. vol. 47 (12), 2011, pp. 4701-4706